

표면코팅된 경량골재를 사용한 콘크리트의 탄산화 저항성에 관한 연구

A Study on Carbonation Resistance of Concrete Using Surface-coated Lightweight Aggregates

엄 인 혁 정 의 창 김 영 수*

Eom, In-Hyeok Jeong, Euy-Chang Kim, Young-Su*

Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Geumjeong-Gu, Busan, 609-735, Korea

Abstract

The purpose of this study is to investigate the mechanical properties and carbonation resistance of concretes using lightweight aggregate coated surface finishing materials. To evaluate the mechanical properties and carbonation resistance of concrete, slump, air amount, air-dried unit volume weight, compressive strength, and carbonation depth are tested. In terms of the unit volume weight of concrete, air-dried unit volume weight of concrete using coating lightweight aggregate was measured as 1,739~1,806kg/m³. When using coating aggregate, compressive strength of concrete at 28 days was measured as much as 82.7~95.9% of the compressive strength using non-coating aggregate. It is found that compressive strength tends to decrease with coating lightweight aggregate. However, all concretes using coating lightweight aggregate except O-LWAC satisfied the criteria for 28-day compressive strength suggested in KS. The measurement of carbonation depth when the water-repellent agent was used found that carbonation depth was reduced by as much as 2.6~6.1%. On the other hand, when using polymer waterproof agent, carbonation depth was reduced by as much as 8.6~12.0%. Consequently, to improve carbonation resistance, polymer waterproof agent was more effective than water-repellent agent. In particular, epoxy showed the most outstanding performance.

Keywords : lightweight aggregate concrete, coating lightweight aggregate, carbonation, surface finishing materials

1. 서 론

1.1 연구의 목적

오늘날 건설구조물의 대부분은 콘크리트를 주재료로 사용함에 따라 콘크리트의 70% 이상을 차지하는 골재를 공급하기 위해 무분별한 골재 채취가 이루어지고 있다. 이로 인해 천연골재의 고갈현상이 심화되고 있으며, 환경 파괴로 인한 사회적인 문제도 발생하고 있다. 국토교통부 자료에 따르면, 우리나라에서 개발 가능한 천연골재의 양을 감안할 때, 20년 이내에 심각한 골재고갈위기에 처할

것으로 예상하고 있다.

이를 해결하기 위하여 경량골재의 사용이 제시되고 있으나, 경량골재의 내부공극으로 인해 골재의 흡수율이 증가하고[1,2] 콘크리트의 압축강도를 저하시키며 워커빌리티에 악영향을 미치며[3], 특히 경량골재의 내부공극을 통한 탄산가스 유입으로 인해 경량골재콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 탄산화가 더 빠르게 진행되는 문제점이 있다[4].

이러한 한계점을 극복하고자, 경량골재를 콘크리트 표면 마감재로 코팅하여 골재의 흡수율을 개선시키고 콘크리트의 워커빌리티를 향상시키는 연구가 진행되었다[5]. 하지만 이러한 연구는 단지 코팅(coating) 경량골재와 콘크리트의 물리적 특성[6], 동결융해[7]에 관한 평가만이 이루어졌을 뿐 탄산화에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 코팅 경량골재를 사용

Received : July 25, 2013

Revision received : October 29, 2013

Accepted : November 11, 2013

* Corresponding author : Kim, Young-Su

[Tel: 82-51-510-2443, E-mail: kys@pusan.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

한 콘크리트에 대하여 표면 코팅제의 종류에 따른 탄산화 저항성을 보통 경량골재콘크리트, 보통콘크리트와 비교 분석함으로써, 내구성 평가를 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

1.2 연구의 방법

본 연구에서는 코팅 경량골재를 사용한 콘크리트의 물리적인 특성과 내구성을 평가하기 위하여 보통콘크리트와 경량골재콘크리트, 코팅 경량골재를 사용한 콘크리트의 물리적 특성으로서 압축강도와 단위용적질량을 설정하였고, 내구성을 평가하기 위한 요인으로는 콘크리트의 탄산화만을 대상으로 하였다. 또한, 경량골재 코팅에 사용되는 재료는 기존의 연구[5,6]에서 골재의 흡수율 개선에 효과적이라고 알려진 4가지 종류의 표면코팅제(수성발수제, 유성발수제, 에폭시, 우레탄)를 사용하였다.

이와 같이 본 연구에서는 코팅 경량골재의 사용을 통한 콘크리트의 탄산화 저항성에 대한 평가를 위한 기초자료를 제시하고자, 표면 코팅제의 종류와 코팅의 유무에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

코팅 경량골재를 사용한 콘크리트의 물리적 특성과 탄산화 저항성을 평가하기 위하여 경량골재 코팅에 사용되는 표면 코팅제의 종류를 주요 실험인자로 선정하였다.

Table 1. Experiment factor and assessment

Experiment Factors	W/C	55%
	Surface finishing materials	Water-based water repellent / Oil-based water repellent / Epoxy / Urethane
Density and absorption rate	coarse Aggregate	
Compressive strength(day)	3, 7, 14, 28	
Assessment	Air-dried unit volume weight(day)	28
Carbonation depth, Carbonation rate coefficient(day)	7, 28, 56	

Table 2. Mixing design of concrete

Type	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)			Superplasticizer
			Water	Cement	Fine Aggregate	
NWAC					1044	
LWAC					635	
W-LWAC	55	45	165	300	867	0.5
O-LWAC					579	
E-LWAC					591	
U-LWAC					587	

※ W-LWAC

NWAC : Normal-weight aggregate concrete
 LWAC : Light-weight aggregate concrete
 W : Water-based water repellent coating,
 O : Oil-based water repellent coating
 E : Epoxy coating, U : Urethane coating

경량골재 코팅에 사용된 재료는 기존의 연구를 통해 [5,6] 경량골재의 흡수율 개선에 효과적이라고 알려진 코팅재료로 각각 2가지 종류의 방수제와 발수제를 선정하였다. 콘크리트 표면 마감재로 많이 사용되는 방수제인 에폭시(epoxy)와 우레탄(urethane)을 사용하였고, 고분자계 코팅제의 일회용성을 고려하여 반복사용이 가능한 재료로 수성발수제와 유성발수제를 사용하였다. 본 연구를 위한 실험인자 및 평가항목은 Table 1과 같으며, 본 연구에 사용된 배합설계는 Table 2와 같다.

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 연구에 사용한 시멘트의 물리적 특성과 화학 분석에 관한 내용은 Table 3과 같다.

Table 3. Physical properties and chemical composition of cement

Physical properties	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time (hr:min)		lg.loss (%)	Soundness	Compressive strength(MPa)		
			Initial	Final			3day 7day 28day		
							3day	7day	28day
	3.15	3,376	4:12	5:01	2.73	0.12	31.6	44.8	56.8
Chemical composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	lg.loss
	20.13	5.78	3.32	62.29	2.42	0.64	1.06	1.63	2.73

2.2.2 골재

본 연구에 사용된 골재의 물리적 특성은 Table 4와 같다.

Table 4. Physical properties of aggregate

Type of aggregate	Maximum size (mm)	Fineness modulus	Density	absorption ratio (%)	Solid volume (%)	Unit volume weight (kg/ℓ)	
coarse aggregate	Normal-weight	20	6.80	2.69	1.48	58.40	1.69
	Light-weight	20	6.98	1.80	5.3	55.82	0.97
Fine aggregate	5	2.85	2.56	2.33	64.35	1.68	

2.2.3 표면코팅제

본 연구에 사용한 표면 코팅제는 국내에서 시판 중인 수성발수제와 유성발수제, 에폭시, 우레탄을 사용하였으며, 표면코팅제의 물리적 성질은 Table 5와 같다.

Table 5. Physical properties of surface finishing materials

	Component	Color	Density	Type
Water-based water repellent	Silicone resins	Colorless	0.96	Liquid
Oil-based water repellent	Silicone resins	Colorless	0.98	Liquid
Epoxy	Epoxy resins	Colorless (gloss)	0.98	Liquid
Urethane	Urethane resins	Colorless (gloss)	0.98	Liquid

2.2.4 고성능 AE감수제

본 연구에 사용된 고성능 AE감수제의 물리적 특성은 Table 6과 같다.

Table 6. Physical properties of admixture

Main component	Type	Color	Density	Chloride	Toxicity
Superplasticizer	Polycarbon	Liquid light brown	1.18 ±0.05	X	X

2.3 실험방법

2.3.1 코팅경량골재 제작방법

코팅 경량골재는 수성발수제와, 유성발수제, 에폭시, 우레탄에 각각 24시간 침지시킨 후 실내에서 24시간 이상 건조하여 제작하였다. 골재는 20±5℃의 물에서 24시간 담근 후 흡수천 위에 올려 눈에 보이는 수막을 제거한 것을 표건상태로 하여 사용하였다.

2.3.2 골재 및 콘크리트 실험방법

본 연구의 실험에 대한 표준은 Table 7과 같다.

Table 7. Method of test for aggregate and concrete

Method of test		
Density and absorption rate of coarse aggregate	KS F 2503 "Testing method for density and absorption of coarse aggregate"	
	KS F 2533 "Methods of test for particle density and water absorption of light weight coarse aggregate of structural concrete"	
Air amount	KS F 2421 "Method of test for air content of fresh concrete by pressure method"	
	Slump	KS F 2402 "Method of test for slump of concrete"
Concrete	Air-dried unit volume weight	KS F 2462 "Standard test method for unit weight of structural light weight concrete"
	Compressive strength	KS F 2405 "Standard test method for compressive strength of concrete"
Carbonation	KS F 2584 "Standard test method for accelerated carbonation of concrete"	
	KS F 2596 "Method for measuring carbonation depth of concrete"	

2.3.3 콘크리트의 탄산화 깊이 예측

측진 탄산화 실험 후 재령에 따른 탄산화 깊이를 측정하여 속도계수 A를 (Equation 1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$C = A \cdot \sqrt{t} \text{ ----- (Equation 1)}$$

여기서, c : Carbonation depth(mm)

A : Carbonation rate coefficient

t : Age(week)

일반대기 중에서는 탄산화 진행속도가 완만하게 나타나기 때문에, 탄산화에 관한 성능을 단기간 내에 평가하기 위하여 측진 탄산화 시험에 의한 방법이 사용되고 있다. 일반적으로 대기 중의 CO₂ 농도는 실외 0.03%, 실내 0.1% 정도이나 측진 탄산화 시험에서는 CO₂ 농도를 5%

로 하여 수행한다. 이 촉진 탄산화 시험에 의해 얻어진 탄산화 깊이와 일반대기 중의 탄산화 깊이와의 관계를 정의하면, 대기 중의 탄산화 깊이 C_a 는 (Equation 2)을 통해 구할 수 있다.[8]

$$C_a = A \sqrt{\frac{CO_2}{5}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{----- (Equation 2)}$$

여기서, C_a : Carbonation depth in ambient condition(mm)

CO_2 : CO_2 concentration in ambient condition(%)

A : Measured Carbonation rate coefficient by acceleration carbonation test

t : Age(week)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경량골재의 흡수율 및 밀도

골재의 흡수율 및 밀도를 측정한 결과, Figure 1과 Figure 2와 같이 나타났다.

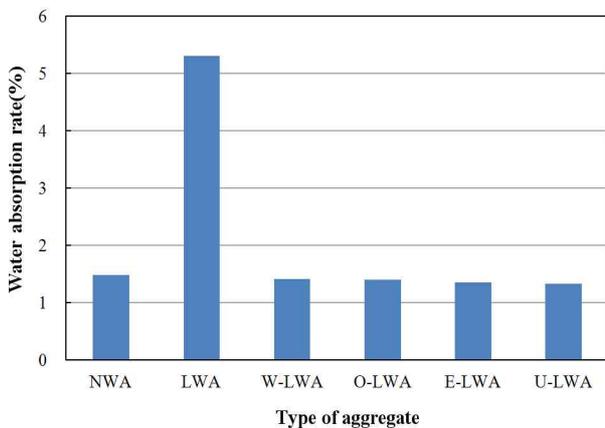


Figure 1. Water absorption rate of coarse aggregate

골재의 흡수율 시험결과, 코팅 경량골재의 흡수율은 경량골재뿐만 아니라 보통골재의 흡수율보다도 낮은 값을 나타내었다. 특히, 수성발수제와 유성발수제를 사용하였을 경우 각각 1.41%, 1.40%로 측정된 반면, 고분자계 방수제인 에폭시와 우레탄을 사용한 경우 각각 1.35%, 1.33%로 측정되어 더 우수한 흡수율 개선효과를 나타내었다. 발수제의 경우 골재 표면의 접촉각이 커져 물을 밀어냄에 따라 골재 내부로의 수분침투가 억제된 것으로 판단되며, 고분자계 방수제의 경우 코팅막 형성을 통해 물

을 완전히 차단하여 흡수율이 개선된 것으로 판단된다.

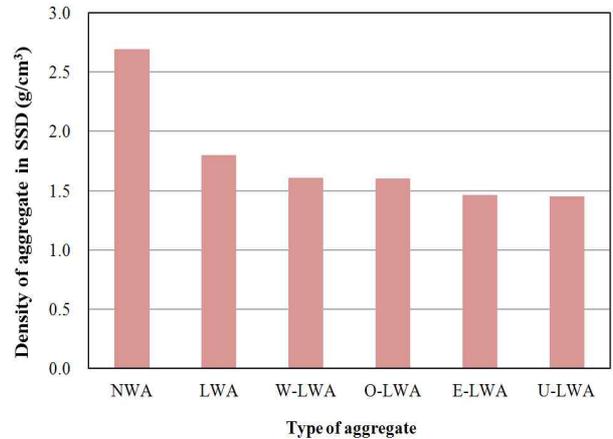


Figure 2. Density of aggregate in SSD

골재의 밀도 시험결과에서는 코팅 경량골재의 표견밀도가 $1.45 \sim 1.61 g/cm^3$ 의 범위로 측정되어 경량골재의 표견밀도보다 더 낮은 값을 보였다. 이는 표면 코팅으로 인해 경량골재의 내부가 포수되지 않아 여전히 빈 공간이 존재하기 때문에 밀도가 감소한 것으로 판단되었다. 특히, 에폭시와 우레탄과 같은 고분자계 표면 코팅제를 사용한 경우에는 표면에 약 1mm의 코팅영역이 형성되어 골재의 부피가 증가하여 밀도감소가 더 큰 것으로 판단된다.

3.2 코팅 경량골재콘크리트의 물리적 특성

모든 배합은 시험배합을 통해 슬럼프와 공기량을 유사한 수준으로 조정하여 슬럼프 및 공기량이 콘크리트의 물리적 특성 및 탄산화 저항성에 영향을 미치지 않도록 하였다.

3.2.1 압축강도

경량골재 코팅에 사용된 표면 코팅제의 종류가 경화 콘크리트의 물리적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 압축강도 시험한 결과, Figure 3과 같이 나타났다.

코팅 경량골재를 사용한 콘크리트의 압축강도(24.5~28.4MPa)는 비코팅 경량골재를 사용한 콘크리트의 압축강도(29.6MPa)보다 낮은 압축강도를 보였다. 특히 유성발수제와 우레탄으로 코팅하였을 때 더 낮은 압축강도를 나타내었다.

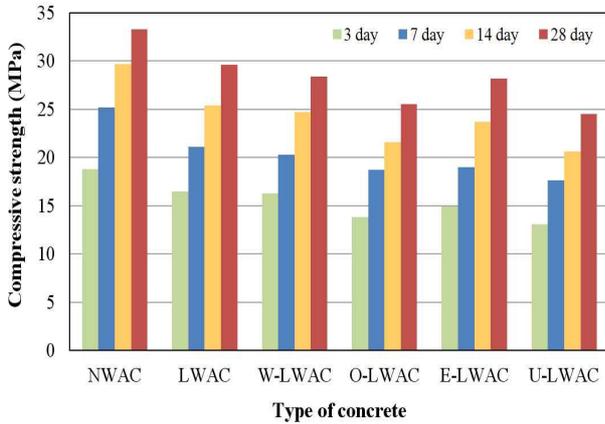


Figure 3. Compressive strength of concretes

이는 경량골재를 유성발수제로 코팅한 경우, 유기 용제의 사용으로 인해 골재와 시멘트 모르타르와의 부착성 또는 골재 계면과의 결합력이 떨어져 강도저하가 더 나타나는 것으로 판단된다[5]. 또한, 본 연구에 사용된 우레탄은 경도 Shore A 90 ± 5 의 연질의 경도를 가지는 제품을 사용함에 따라 코팅 시 낮은 경도의 골재 피막이 형성되어 콘크리트의 압축강도에 부정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.2.2 기건 단위용적질량

Figure 4와 같이, 콘크리트의 기건 단위용적질량은 비코팅 경량골재를 사용한 콘크리트에 비하여 W-LWAC, O-LWAC, E-LWAC, U-LWAC에서 각각 1.37, 2.02, 4.42, 5.02%만큼의 질량 감소를 보였다.

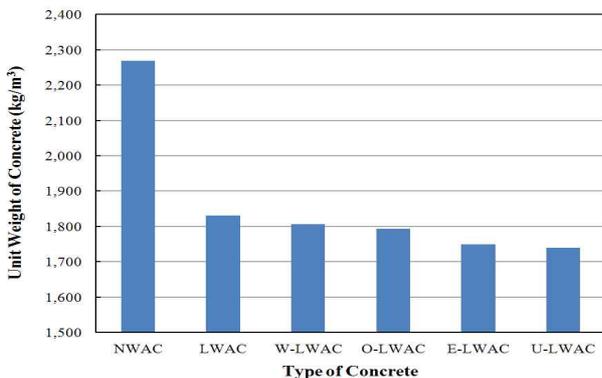


Figure 4. Unit volume weight of concrete

이는 경량골재를 기건상태에서 코팅하였기 때문에 골재를 표건상태로 조정하기 위해 24시간 침수를 하더라도

코팅에 의해 경량골재 내부포수가 완전히 이루어지지 않아 콘크리트의 기건 단위용적질량 감소에도 영향을 미치는 것으로 판단된다. 특히, 에폭시와 우레탄을 사용하여 코팅한 경우, 약 1mm의 코팅막 형성으로 골재밀도가 낮아졌기 때문에 콘크리트 기건 단위용적질량도 더 감소된 것으로 판단된다.

한편, KS F 2534 “구조용 경량 골재”에서는 경량골재콘크리트의 기건 단위용적질량에 따라 재령 28일 압축강도 기준을 제시하고 있으며, 그 내용은 Table 8과 같다. 각각의 콘크리트에 대한 기건 단위용적질량과 재령 28일 압축강도를 KS 기준과 비교한 결과, Table 9와 같이 유성발수제를 사용한 경우를 제외하고 모두 만족하는 값을 나타내어 나머지 3개의 표면 코팅제로 코팅된 경량골재는 실제로 사용 가능한 것으로 판단된다.

Table 8. 28 day compressive strength criteria for air-dried unit volume weight proposed KS(Korean Industrial Standards)

	Air-dried unit volume weight(kg/m ³)	28 day compressive strength(MPa)
Light weight aggregate concrete	Less than 1,840	More than 27.0
	Less than 1,760	More than 21.0
	Less than 1,680	More than 18.0

Table 9. Air-dried unit volume weight and 28 day compressive strength measured by test

	Air-dried unit volume weight(kg/m ³)	28 day compressive strength(MPa)
LWAC	1,831	29.6
W-LWAC	1,806	28.4
O-LWAC	1,794	25.5
E-LWAC	1,750	28.2
U-LWAC	1,739	24.5

3.3 코팅 경량골재콘크리트의 탄산화

3.3.1 탄산화 촉진재령에 따른 탄산화 깊이

Figure 5, Figure 6, Figure 7은 각각의 배합에 따른 콘크리트의 탄산화 깊이를 나타낸 것이다.

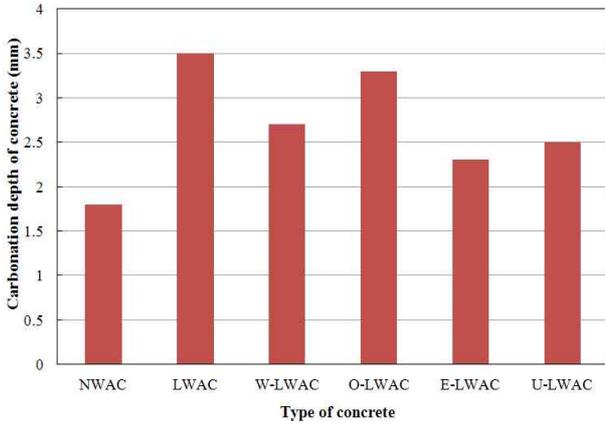


Figure 5. Carbonation depth of concrete at 7 days

Figure 5에서와 같이 탄산화 촉진재령 7일에는 수성발수제, 유성발수제, 에폭시, 우레탄으로 코팅한 경우 비코팅 경량골재와 비교하여 각각 22.9, 5.7, 34.3, 28.6%의 탄산화 깊이 감소를 보여 표면코팅의 탄산화 개선효과가 크다는 것을 알 수 있었다. 하지만 Figure 6, Figure 7에 나타나있듯이, 탄산화 촉진재령이 증가할수록 탄산화 개선효과는 다소 줄어드는 경향을 보였다.

또한, 경량골재 코팅 시 발수제보다 고분자계 방수제를 사용하였을 때 더 작은 탄산화 깊이가 측정되었다. 이는 발수제를 사용한 경우 골재 공극 내부에 매우 얇은 코팅막을 형성하여 발수기능을 발휘하기 때문에 골재의 내부 공극을 통해 탄산가스의 이동이 부분적으로 이루어진 반면에, 고분자계 방수제는 골재의 표면에 두꺼운 코팅막을 형성하여 골재의 내부공극이 완전히 차단되었기 때문인 것으로 판단된다.

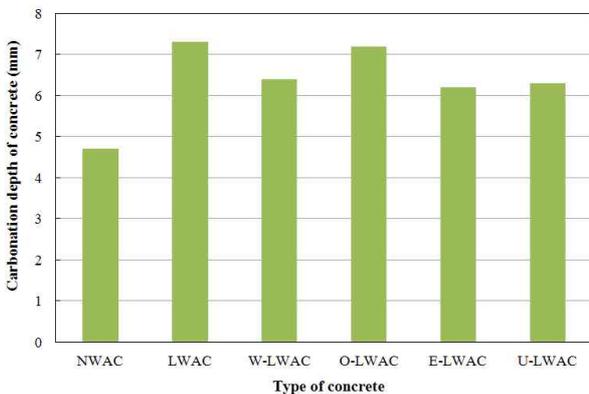


Figure 6. Carbonation depth of concrete at 28 days

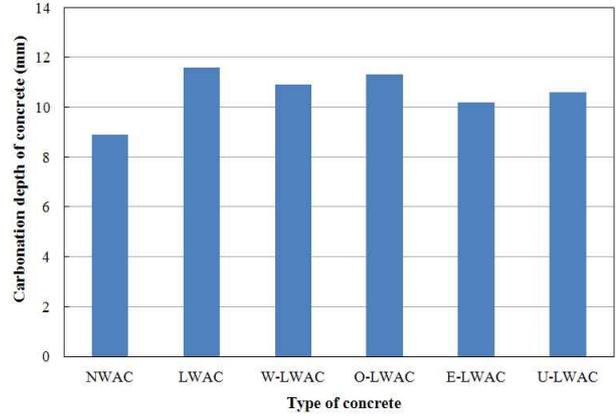


Figure 7. Carbonation depth of concrete at 56 days

Figure 7에 나타나있듯이, 탄산화 촉진재령 56일에서 수성발수제, 유성발수제, 에폭시, 우레탄으로 코팅된 경량골재를 사용한 경우 탄산화 깊이는 각각 10.9, 11.3, 10.2, 10.6mm로 측정되어, 비코팅 경량골재를 사용하였을 때보다(11.6mm) 탄산화 깊이가 감소된 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 보통골재를 사용한 콘크리트의 탄산화 깊이(8.96mm)보다는 크게 나타났다.

이는 표면코팅이 경량골재의 내부공극을 통한 탄산화 진행을 억제하여 콘크리트의 탄산화 깊이가 감소된 것으로 판단된다. 하지만 표면코팅으로 인해 골재의 표면이 매끈해짐에 따라 골재-모르타르 간의 부착강도 저하하여 발생된 미세균열을 통해 탄산화가 진행되어, 보통골재만큼의 탄산화 저항성은 보이지 못한 것으로 판단된다.

3.3.2 탄산화 속도계수를 이용한 내구연한 예측

촉진 탄산화 시험을 통해 측정된 탄산화 깊이와 Eq.(1), Eq.(2)를 이용하여 촉진 탄산화 속도계수와 일반대기 중에서의(실내 : 0.1%) 탄산화 속도계수를 계산한 결과, Table 10과 같이 나타났다.

Table 10. Carbonation rate coefficient of concretes

	Accelerated carbonation rate coefficient (mm/week)	Carbonation rate coefficient in ambient condition (mm/week)
NWAC	3.15	0.45
LWAC	4.10	0.58
W-LWAC	3.85	0.55
O-LWAC	4.00	0.57
E-LWAC	3.61	0.51
U-LWAC	3.75	0.53

발수제를 사용한 경우 2.6~6.0% 개선효과를 보였으며, 방수제를 사용한 경우 8.6~12.1% 개선효과를 나타내었다.

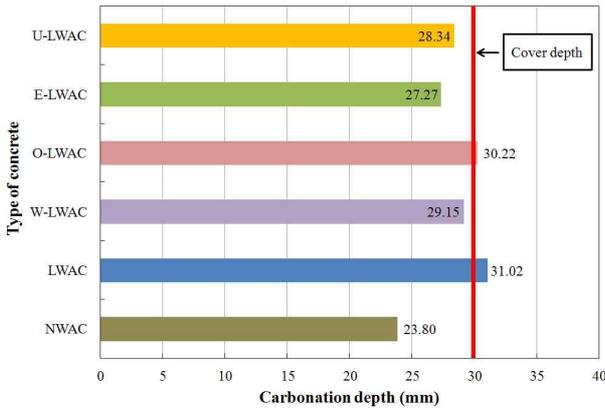


Figure 8. Carbonation depth in ambient condition at 55 years

Figure 8은 일반대기 중에서 55년 경과 후의 탄산화 깊이를 예측한 결과이다. 비코팅 경량골재를 사용한 경우 31.02mm로 측정된 것에 비해 코팅 경량골재를 사용할 시 27.27~30.22mm로 측정되어, 유성발수제를 사용한 경우를 제외한 나머지는 시공 후 55년간 탄산화를 제외한 내구성 손상이 없다면 안전할 것으로 판단되며, 에폭시로 코팅하였을 때 가장 우수한 성능을 발휘할 것으로 보여진다.

4. 결 론

본 연구에서는 흡수율 개선에 효과적으로 알려진 표면코팅된 경량골재의 사용 가능성을 판단하고자 경량골재 콘크리트의 기건단위용적중량과 압축강도를 측정하였으며, 탄산화 저항성에 관하여 평가하고자 촉진탄산화시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 골재의 흡수율을 측정한 결과, 비코팅 경량골재의 흡수율이 5.30%인 것에 비해, 코팅 경량골재의 흡수율은 1.33~1.40%로 측정되어 표면코팅으로 인한 골재의 흡수율 저감효과가 우수한 것으로 나타났다.
- 2) 코팅 경량골재를 굵은 골재로 사용한 콘크리트의 기건 단위용적중량은 1,739~1,806kg/m³으로 측정되어 비코팅 경량골재보다 1.37~5.02% 만큼 더 경

량화 할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

- 3) 코팅 경량골재를 굵은 골재로 사용할 경우 콘크리트 28일 압축강도는 24.5~28.4MPa로 측정되었다. 비코팅 경량골재를 사용한 경우와 비교하여 82.7~95.9% 수준을 보여 표면코팅 시 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 유성발수제를 제외하고는 KS 표준에서 제시하고 있는 기건 단위용적중량에 대한 28일 압축강도 기준을 모두 만족하여 콘크리트용 골재로 사용가능하다는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 탄산화 촉진재령 56일에서 발수제를 사용한 경우 10.9~11.3mm의 탄산화 깊이가 측정되어 코팅에 의한 탄산화 깊이 감소율이 2.6~6.0%로 측정된 반면에, 고분자계 방수제를 사용한 경우 10.2~10.6mm의 탄산화 깊이가 측정되어 8.6~12.1%의 감소율을 나타내어, 발수제보다 고분자계 방수제가 탄산화 저항성 개선에 더 효과적이었으며, 그 중 에폭시가 가장 우수한 성능을 나타내었다.

이상의 결과와 같이 표면코팅제에 의한 경량골재의 코팅이 탄산화 저항성 향상에 효과가 있다는 결론을 얻었다. 향후, 경량골재로서의 활용성을 높이기 위하여 압축강도 증진을 위해 포졸란재 사용에 관한 연구가 필요하며, 황산염침식, 알칼리골재반응 등과 같은 내구성에 관련된 연구도 계속 진행되어야 할 것으로 판단된다.

요 약

경량골재의 내부공극을 통한 탄산가스 유입으로 인해 경량골재콘크리트는 보통콘크리트에 비해 탄산화가 더 빠르게 진행되는 문제점을 극복하고자, 4가지 표면코팅제로 코팅된 경량골재를 사용한 콘크리트에 대하여 탄산화 저항성을 보통 경량골재콘크리트, 보통콘크리트와 비교분석하였다. 코팅경량골재를 사용한 콘크리트가 보통 경량골재콘크리트보다 우수한 탄산화 저항성을 보였으며, 특히 발수제보다는 고분자계 코팅제를 사용하였을 때 더 우수한 저항성을 나타내었다.

키워드 : 경량골재콘크리트, 코팅경량골재, 탄산화

References

1. Y Lo, Gao XF, Jeary AP. Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete. *Building and Environment*, 1999 Nov;34(6):759–64.
2. Liao N, Cui HZ. Surface modification for porous artificial lightweight aggregate and mechanical properties of the resulting concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 2012 Oct;117(119):1302–5.
3. Kwon DS. A study on the physical characteristics of lightweight aggregate concrete applied pressure by containing moisture condition in lightweight aggregates [master' s thesis]. [Seoul (Korea)]: Konkuk University; 2012. 82 p.
4. Kwon JK. A study on hydration and durability properties of concrete using artificail lightweight aggregate [dissertation]. [Seoul (Korea)]: University of Seoul; 2011. 104 p.
5. Park SI, Sa SW, Kim SH, Jee SW, Seo CH. An experimental study on absorption and change of component of water repellent coating treated lightweight aggregate concrete. *Proceeding of The Architectural Institute of Korea*; 2010 Oct 24; Gwangju (Korea). Seoul (Korea): The Architectural Institute of Korea; 2010. p. 267–70.
6. Kim SH, Kim SH, Seo CH. Study on mechanical property of lightweight aggregate concrete with coated-lightweight aggregate. *Proceeding of The Korea Institute of Building Construction*, 2011 May 20; Busan Korea. Seoul(Korea): The Korea Institute of Building Construction, 2011. p. 87–8
7. Yoon SI. A study in the properties of lightweight aggregate concrete using concrete waterproof admixture [master' thesis]. [Seoul (Korea)]: Konkuk University; 2009. 72 p.
8. Kim JH. An experimental study on teh evaluation of a restrain-performance for concrete covered with surface-finishes against carbonation and chloride attack used in the domestic apartment [master' s thesis]. [Seoul (Korea)]: Hanyang University; 2012. 60 p.